

Primljen / Received: 30.6.2017.

Ispravljen / Corrected: 16.4.2018.

Prihvaćen / Accepted: 30.5.2018.

Dostupno online / Available online: 10.12.2018.

# Učinci popuštanja stropne ploče na seizmički odziv tlocrtno nesimetrične konstrukcije

## Autori:



Mr.sc. **Hamed Eivani**, dipl.ing.građ.  
Islamsko sveučilište Azad, Teheran, Iran  
Građevinski fakultet  
[H\\_aivani@yahoo.com](mailto:H_aivani@yahoo.com)



Izv.prof.dr.sc. **Abdolreza S. Moghadam**, dipl.ing.građ.  
Međunarodni institut za potresno inženjerstvo i seizmologiju - IIEES  
Teheran, Iran  
[moghadam@iiees.ac.ir](mailto:moghadam@iiees.ac.ir)



Doc.dr.sc. **Armin Aziminejad**, dipl.ing.građ.  
Islamsko sveučilište Azad, Teheran, Iran  
Građevinski fakultet  
[armin.aziminejad@gmail.com](mailto:armin.aziminejad@gmail.com)



Doc.dr.sc. **Masoud Nekooei**, dipl.ing.građ.  
Islamsko sveučilište Azad, Teheran, Iran  
Građevinski fakultet  
[msnekooei@gmail.com](mailto:msnekooei@gmail.com)

Prethodno priopćenje

**Hamed Eivani, Abdolreza S. Moghadam, Armin Aziminejad, Masoud Nekooei**

## Učinci popuštanja stropne ploče na seizmički odziv tlocrtno nesimetrične konstrukcije

U ovom se radu istražuje utjecaj popuštanja stropne ploče na seizmički odziv konstrukcija nesimetrična tlocrta. Analizom rezultata možemo uočiti različite posljedice popuštanja, što ovisi o svojstvima nesimetričnog sustava, razmatranom elementu, razini popuštanja ploče i konstrukcije. Za model u elastičnom području, kod unutarnjih se zidova uočava značajan porast odziva, uz moguće pogoršanje zbog nesimetričnih svojstava. Osim toga, kod svih je zidova zamijećen značajan porast odziva u nelinearnom području, koji se ne smije zanemariti.

### Ključne riječi:

popuštanje ploče, konstrukcija nesimetrična tlocrta, seizmički odziv, nelinearna analiza

Preliminary note

**Hamed Eivani, Abdolreza S. Moghadam, Armin Aziminejad, Masoud Nekooei**

## Effects of diaphragm flexibility on seismic response of asymmetric-plan buildings

The effects of diaphragm flexibility on seismic response of asymmetric-plan buildings are investigated in this paper. The results show that the diaphragm flexibility could induce different effects depending on the asymmetric system characteristics, selected element, level of structure yield, and degree of diaphragm flexibility. When the structure behaves in elastic range, central walls exhibit a significant increase in response, and the situation can further be aggravated by asymmetry in system. Also, all walls of the structure experience a significant increase in response in nonlinear range, which cannot be ignored.

### Key words:

diaphragm flexibility, asymmetric-plan structure, seismic response, nonlinear analysis

Vorherige Mitteilung

**Hamed Eivani, Abdolreza S. Moghadam, Armin Aziminejad, Masoud Nekooei**

## Auswirkungen des Absenkens der Deckenplatte auf die seismische Reaktion der asymmetrischen Grundrisskonstruktion

In dieser Abhandlung wird der Einfluss des Absenkens der Deckenplatte auf die seismische Reaktion der asymmetrischen Grundrisskonstruktion untersucht. Durch die Analyse der Ergebnisse können wir unterschiedliche Folgen des Absenkens feststellen, was von den Eigenschaften des asymmetrischen Systems, vom betrachteten Element, vom Niveau des Absenkens der Platte und der Konstruktion abhängt. Für das Modell im elastischen Bereich wird eine deutliche Steigerung der Reaktion bei den Innenwänden festgestellt, mit einer möglichen Verschlechterung aufgrund der asymmetrischen Eigenschaften. Darüber hinaus wurde bei allen Wänden eine erhebliche Steigerung der Reaktion im nicht linearen Bereich festgestellt, die nicht vernachlässigt werden sollte.

### Schlüsselwörter:

Absenken der Platte, asymmetrische Grundrisskonstruktion, seismische Reaktion, nicht lineare Analyse

## 1. Uvod

U većini prijašnjih studija o konstrukcijama nesimetrična tlocrta polazilo se od osnovne pretpostavke da je ploča neizmjenjerno kruta. Zbog toga raspodjela sila inercije između bočnih nosivih elemenata - BNE (eng. *lateral load-resisting elements*) ovisi samo o masi, krutosti i čvrstoći konstrukcije. Međutim, u mnogim slučajevima takva pretpostavka nije prikladna, jer se ploče (naročito u slučaju konstrukcije nesimetrična tlocrta) odlikuju različitim razinama popuštanja [1-4].

Popuštanje ploče može promijeniti raspodjelu sila inercije između BNE i tako stvoriti razliku između ponašanja numeričkog modela i konstrukcije tijekom potresa. Ekstreman su primjer modeli s potpuno fleksibilnim pločama, pa se raspodjela sila inercije između BNE određuje samo na temelju pripadajućih sudjelujućih površina. Torzijski odziv takvih modela ne razmatramo.

Zbog istodobnog utjecaja popuštanja ploče i nesimetričnosti konstrukcije na raspodjelu sila inercije između BNE, ocjena združenoga učinka jedan je od osnovnih ciljeva ovoga istraživanja. Ta su djelovanja tek u manjoj mjeri analizirana u prijašnjim studijama.

Utjecaj popuštanja ploče na odziv nesimetričnih konstrukcija u ovom se radu istražuje primjenom postupka vremenske diskretizacije. Razmatra se širok raspon popuštanja, od neizmjenjerno krute do potpuno fleksibilne. Značajni faktori nesimetričnih konstrukcija koji se razmatraju u postupku numeričkog modeliranja su: period odziva u smjeru nekoga stupnja slobode (tzv. "čisti" odziv), zatim ekscentrična razdioba krutosti, te omjer čiste torzijske i bočne frekvencije. Izračunavaju se omjeri odziva modela s popustljivom i sličnih modela s neizmjenjerno krutom pločom, radi određivanja učinaka fleksibilnosti na ponašanje konstrukcije.

### 1.1. Pregled literature

Iako su se istraživanja o konstrukcijama nesimetrična tlocrta počela provoditi prije otprilike sedam desetljeća, one se najčešće temelje na pretpostavci o neizmjenjerno krutoj ploči. Međutim, prema zaključcima novijih istraživanja [2, 3], za mnoge konstrukcije takva pretpostavka nije realna. Upozorava se na različite razine popuštanja ploče, što ovisi o položaju BNE, odnosu tlocrtnih dimenzija, vrsti ploče i postupku proračuna. Općenito, u većini prijašnjih istraživanja utjecaj popuštanja je analiziran samo na simetričnim konstrukcijama [5-7]. Istraživanja pokazuju da popuštanje više utječe na seizmički odziv nižih građevina s krućim BNE [8], nižim katovima [6], manjim brojem raspona [5, 8] i većim omjerom tlocrtnih dimenzija [5, 6].

Moon i Lee [9] su pokazali da popuštanje ploče povećava temeljni period i mijenja pripadajući oblik titranja konstrukcije. Zaključili su da popuštanje, premda može smanjiti poprečnu reakciju, u pravilu uzrokuje veće opterećenje unutarnjih BNE.

Tremblay i Stierner [10] su ustanovili da pretpostavka o krutoj ploči dovodi do podcjenjivanja deformacija, sila i maksimalnih

pomaka ploče, ali i zahtijevane duktilnosti BNE. Na temelju parametarske studije sa simetričnim armiranim zidanim konstrukcijama, Kim i White [11] su utvrdili da maksimalna deformacija u ravni zida nastaje ako ploča djelomice popušta. Također, neki su radovi pokazali i bitno opadanje torzijskog odziva s popuštanjem ploče [1, 12-14].

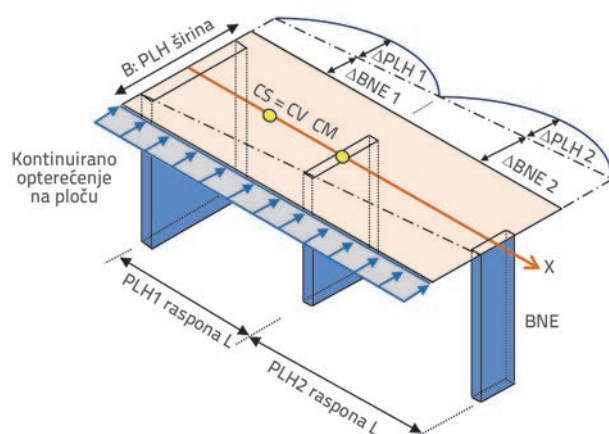
Tena-Colunga i Abrams [14] također ističu da projektiranje konstrukcija nesimetrična tlocrta zasnovano na pretpostavci o krutoj ploči nije na strani sigurnosti, bez obzira na to što torzijski odziv s popuštanjem opada. Nakamura i dr. [15] primjećuju da svojstva poprečnih zidova ne utječu bitno na seizmički odziv nesimetričnih konstrukcija s popustljivom pločom, odnosno da doprinos postoji samo ako je riječ o vrlo krutim pločama. U opsežnoj parametarskoj studiji Eivani i dr. [16] ocjenjuju razne nesimetrične dispozicije s popustljivim pločama i različitim položajima središta (mase, krutosti i čvrstoće). Oni zaključuju da su položaji bliski središtima sličnih modela s krutom pločom.

### 1.2. Indeks popuštanja ploče

Koeficijent statičkog popuštanja  $\gamma_{PL-i}$  ploče  $i$  [17] definiramo omjerom maksimalnog horizontalnog pomaka ploče  $\Delta_{PLH-i}$  i prosječnog pomaka BNE  $\Delta_{BNE-f}$  za slučaj konstantnog bočnog opterećenja uzduž ploče (slika 1.):

$$\gamma_{PL-i} = \frac{\Delta_{PLH-i}}{\Delta_{BNE-i}} \quad (1)$$

U konstrukcijama nesimetrična tlocrta svaki raspon može imati različiti  $\gamma_{PL-i}$ . Budući da je osnovni cilj ovoga rada istražiti utjecaje popuštanja ploče na globalno ponašanje nesimetričnih konstrukcija, potrebno je proračunati globalni koeficijent popuštanja ploče za višeraspanske konstrukcije nesimetrična tlocrta.



Slika 1. Tipično ponašanje ploče u konstrukcijama nesimetrična tlocrta

U okviru sličnog istraživanja za zgrade, Farrow i Fleischman [2] definiraju globalni koeficijent popuštanja ploče kao koeficijent

statičkog popuštanja na sredini visine zgrade, koji je približno jednak prosječnoj vrijednosti svih ploča. Na sličan se način definira i globalni koeficijent popuštanja ploče višeraspanske konstrukcije s nesimetričnim tlocrtom  $\gamma_s$  kao prosječna vrijednost od  $\gamma_{PL_i}$  svih raspona:

$$\gamma_s = \text{Average}(\gamma_{PL_1}, \gamma_{PL_2}, \dots) \quad (2)$$

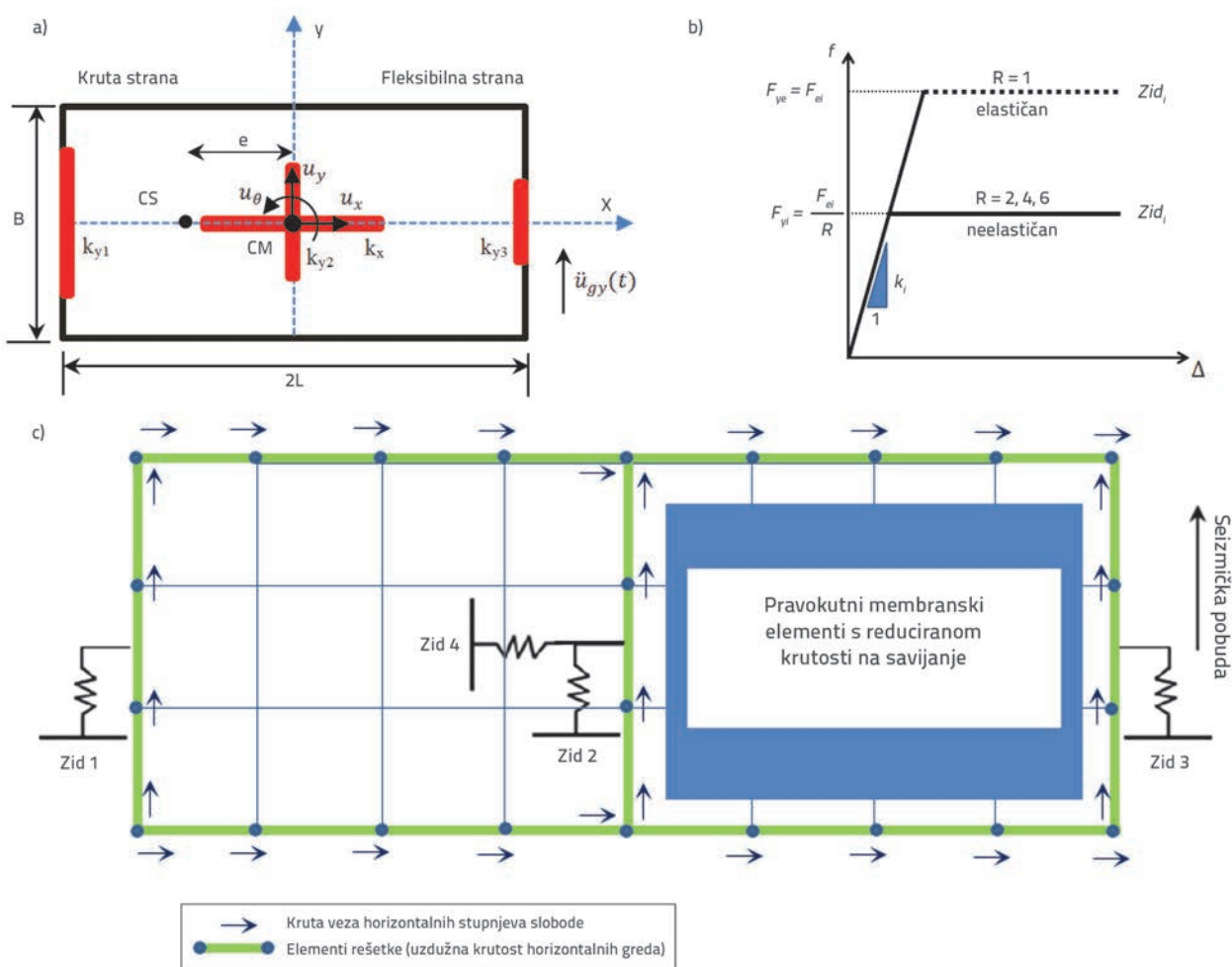
## 2. Statički sustavi i metodologija proračuna

### 2.1. Sustavi s neizmjerljivo krutom pločom

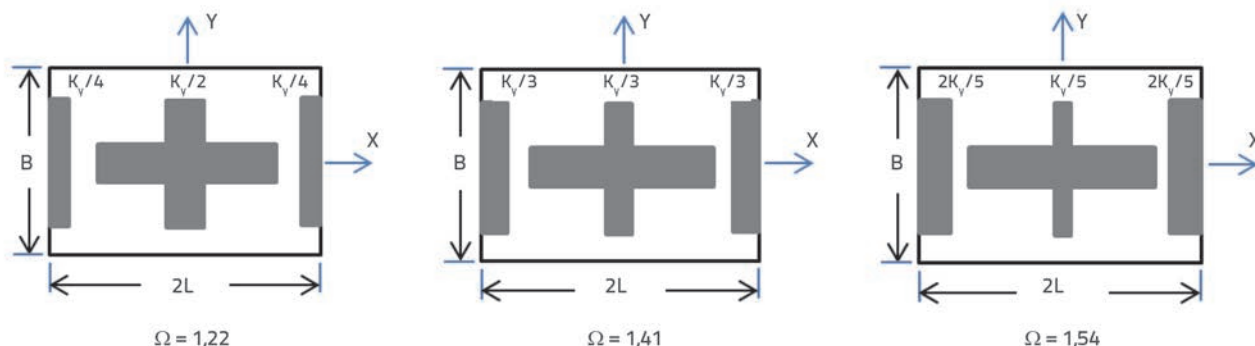
U prvom se koraku analiziraju jednokatni sustavi istih tlocrtnih dimenzija, simetrične i nesimetrične razdiobe krutosti, s neizmjerljivo krutom pločom (slika 2.a). Djeluje horizontalna komponenta seizmičke pobude. BNE mogu biti posmični zidovi i/ili komponente okvira. Krutost elemenata ne ovisi o čvrstoći (slika 2.b). Treba istaknuti, premda su današnji postupci projektiranja temeljeni na toj pretpostavci [17], da neke studije [18, 19] upućuju na određene nedostatke u primjeni na BNE, primjerice na posmične zidove.

Temeljeno na prijašnjim istraživanjima [20], odnos sile i pomaka BNE smatra se bilinearnim, a krutost svih zidova nakon popuštanja iščezava. Prema nalazima Tso-a i Myslimaj-a [21], rezultati histereznog modela s degradacijom uglavnom odgovaraju rezultatima idealno elastoplastičnog modela. Proračuni su provedeni programom OpenSees [22].

U skladu s načelima brojnih normi o seizmičkom projektiranju [17, 23], horizontalne seizmičke dijafragme treba projektirati tako da ostanu elastične. Za modeliranje su upotrijebljeni izotropno elastični pravokutni membranski elementi. Vrsta katne ploče i smjer sekundarnih greda nisu izravno definirani. Provedena je i analiza osjetljivosti modela s obzirom na oblik i gustoću mreže [16]. Radi izbjegavanja koncentracije naprezanja u točkama spajanja BNE i ploče, naročito u fleksibilnim modelima, najprije je uzdužna krutost primarnih greda određena preliminarnim dimenzioniranjem (za djelovanje težine i potresa), a potom je provedeno modeliranje štapovima rešetke (slika 2.c). Primijenjen je Rayleighijev model prigušenja s relativnim iznosom od 5 % za prvi i treći oblik titranja. Ostali su podaci dostupni u Eivanijevu doktorskom radu [16]. Osnovni parametri koji utječu na seizmički odgovor nesimetrične konstrukcije s popustljivim pločama su:  $T$  (period titranja u



Slika 2. Tipični model: a) tlocrt; b) odnos sile i pomaka za BNE; c) numerički model



Slika 3. Vrijednosti i razdiobe krutosti simetrične konstrukcije

smjeru y),  $e$  (ekscentričnost krutosti u smjeru x) i  $\Omega$  (omjer torzijske i bočne frekvencije u smjeru y). Ti su parametri uvedeni na sljedeći način:

- Primijenjene su tri vrijednosti perioda  $T$ : 0,1, 0,5 i 1,0 s. Iznosi su tipični za konstrukcije s kratkim, srednjim i dugim periodima.
- Analizirani su sustavi s malom, srednjom i velikom ekscentričnošću i bez nje ( $e/2L = 0\%$ ,  $5\%$ ,  $10\%$ ,  $20\%$ ). Na svim dijagramima vrijednosti su prikazane skraćeno kao:  $eL = 0\%$ ,  $5\%$ ,  $10\%$  i  $20\%$ .
- Razmatrana su tri omjera  $\Omega$ : 1,22, 1,41 i 1,54 (slika 3.). Budući da je  $\Omega > 1$ , odzivi su dominantno translacijski (torzijski kruti sustavi). Opisani su modeli predstavnici širokog raspona nesimetričnih konstrukcija [19].

## 2.2. Razmatranje popuštanja ploče

Globalni indeks popuštanja ploče mijenjao se od neizmjerne krute ( $\gamma_s = 0$ ) do prilično popustljive ( $\gamma_s = 5,0$ ). Pretpostavljeno je da su tlocrtne mjere i materijal ploče jednaki u oba smjera. Dakle, razlika u krutostima susjednih BNE jedinici je uzrok promjene  $\gamma_{PL-r}$ . Ulazni podaci iz parametarske studije prikazani su u tablici 1.

## 2.3. Postupak proračuna

Za procjenu utjecaja parametara nesimetrične konstrukcije ( $T$ ,  $e$ ,  $\Omega$ ) i popuštanja ploče ( $\gamma_s$ ) na seizmički odziv konstrukcije osmišljen je postupak koji čine sljedeći koraci:

**Korak A:** Oblikovanje etalonskog (testnog) modela s neizmjerne krutom pločom radi određivanja vrijednosti  $T$ ,  $e$  i  $\Omega$ .

1. U skladu s periodima  $T$ , uz pretpostavku realistične ukupne mase  $M$  neizmjerne krute ploče, određena je ukupna krutost bočnih elemenata ( $K_{y0} = \sum k_{y1}$ ):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{y0}}} \Rightarrow K_{y0} = \frac{4\pi^2 M}{T^2}, \quad K_{x0} = K_{y0} \quad (3)$$

2. Rješavanjem triju jednačbi, uz primjenu vrijednosti  $T$ ,  $e$  i  $\Omega$ , dobivene su krutosti bočnih zidova smjera :

$$\begin{cases} k_{y1} + k_{y2} + k_{y3} = K_{y0} \\ k_{y1}(L - e_0) - k_{y2}(e_0) - k_{y3}(L + e_0) = 0 \\ k_{y1}(L - e_0)^2 + k_{y2}(e_0)^2 + k_{y3}(L + e_0)^2 = K_{y0}\Omega^2 r_m^2 \end{cases} \Rightarrow k_{y1}, k_{y2}, k_{y3} \quad (4)$$

gdje je  $r_m$  polumjer tromosti neizmjerne krute ploče.

**Korak B:** Proveden je proračun postupkom vremenske diskretizacije, za opterećenje definirano nizom od 20 zapisa SAC (SEAOC-ATC-CUREE) LA, prilagođenih vjerojatnosti prekoračenja od 10% u 50 godina, prema iranskoj normi 2800 (slika 4.).

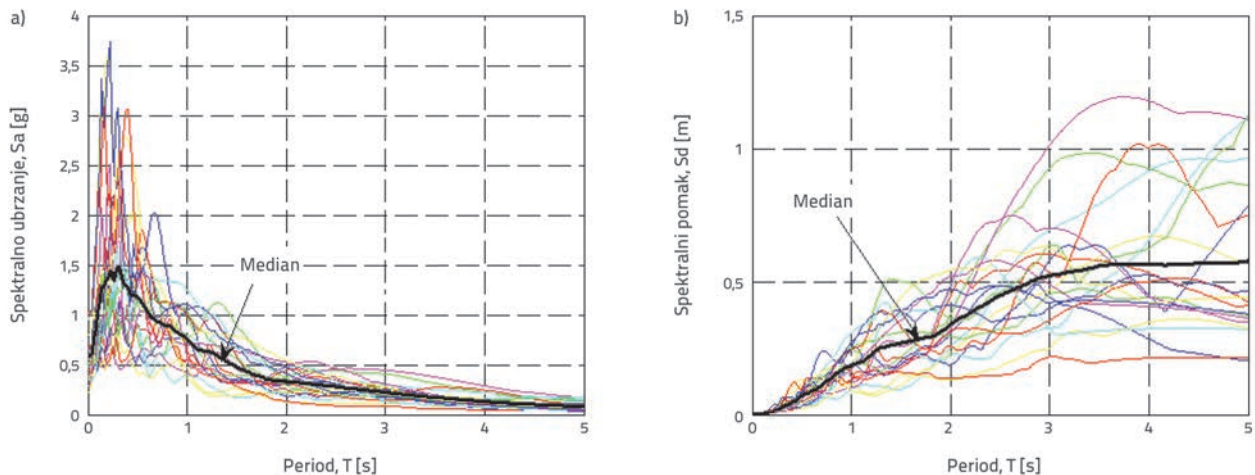
**Korak C:** Reducirana je krutost ploče radi dobivanja indeksa popuštanja  $\gamma_s$ . Odabrana je realistična debljina, a zatim je postupkom pokušaja i pogreške određen modul elastičnosti  $E_g$  tako da popuštanje konvergira prema ciljnoj vrijednosti.

**Korak D:** Analiza nesimetričnih modela s popustljivom pločom:

1. Za svaki je zapis provedena dinamička analiza, pri čemu su određeni maksimalni odzivi. Uvijek je analiziran i pripadajući slučaj s neizmjerne krutom pločom.
2. Radi određivanja učinka popuštanja ploče na seizmičke zahtjeve, upotrijebljeni su bezdimenzijski parametri.

Tablica 1. Svojstva modela iz parametarske studije

Parametri nesimetričnih konstrukcija	Čisti translacijski period ( $T$ )	0,1 s, 0,5 s, 1,0 s
	Ekscentričnost krutosti ( $e/2L$ )	0 %, 5 %, 10 %, 20 %
	Odnos čistog torzijskog i bočnog perioda ( $\Omega$ )	1,22; 1,41; 1,54
Globalni indeks popuštanja ploče ( $\gamma_s$ )		0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0


 Slika 4. Spektri odziva za zapise 20 SAC LA10 ( $\xi = 0,05$ ) [16]: a) spektri ubrzanja; b) spektri pomaka

Primjerice, jednažba:

$$\delta_{zid1,j\_omjer} = \frac{\delta_{zid1,j}}{\delta_{zid1\_krut}} \quad (5)$$

služi za ocjenu učinka popuštanja ploče na bočni pomak zida 1. U toj je jednažbi indeks popuštanja. Jednažbom su određeni koeficijenti odziva za pojedinačni zapis, a nakon toga su određeni odnosi kao

$$\Delta_{zid1,j\_omjer} = e^{\left(\frac{1}{n} \sum \ln \frac{\delta_{zid1,j}}{\delta_{zid1\_krut}}\right)} \quad (6)$$

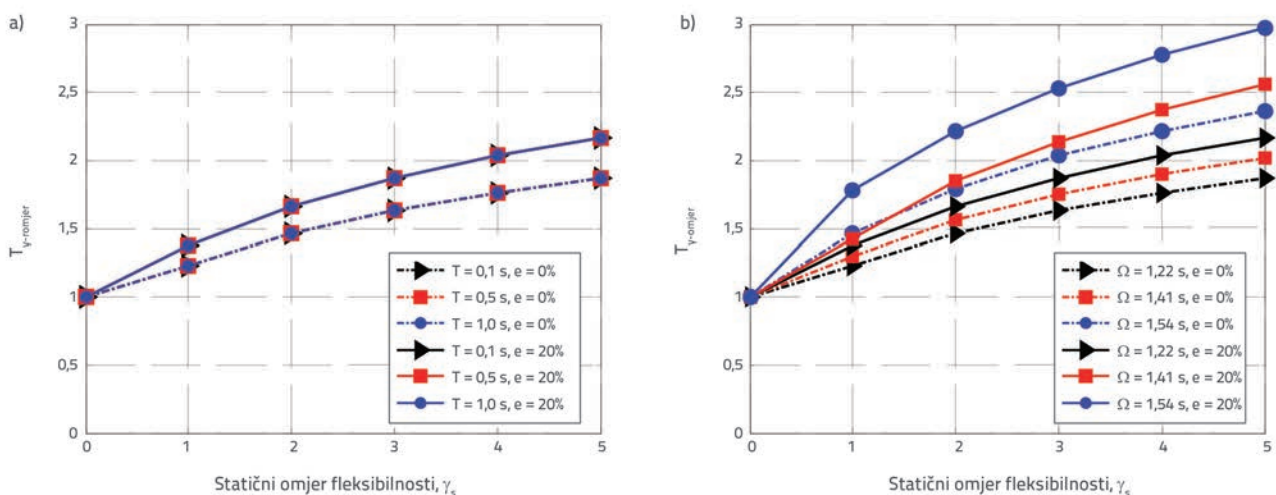
radi dobivanja srednjeg koeficijenta odziva za niz od  $n = 20$  zapisa prema [24].

### 3. Učinci popuštanja ploče na elastični odziv

Na slici 5.a prikazan je omjer temeljnog perioda titranja modela s popustljivom pločom i sličnog modela s apsolutno

krutom pločom,  $T_{y\_omjer}$  u ovisnosti o popuštanju  $\gamma_s$ , za modele s različitim  $T$ . S popuštanjem raste i utjecaj deformacije ploče na translacijske oblike titranja, a ponašanje modela postaje fleksibilnije. Zato  $T_{y\_omjer}$  raste. Na istoj slici možemo uočiti da  $T_{y\_omjer}$  ne ovisi o  $T$ , pa se krivulje s različitim  $T$  podudaraju. Slika 5.b prikazuje utjecaj popuštanja na  $T_{y\_omjer}$  za modele s različitim  $\Omega$ . Modeli s većim  $\Omega$  imaju veći  $T_{y\_omjer}$ , što vrijedi za simetrične i nesimetrične dispozicije. Isto tako, kod većeg  $e$  raste  $T_{y\_omjer}$ . Općenito,  $T_{y\_omjer}$  s popuštanjem raste.

Odnos između srednje vršne relativne deformacije zidova ( $\Delta_{zid-omjer}$ ) i  $\gamma_s$  za model sa  $T = 0,5$  s,  $e = 0\%$  i  $20\%$  te različitim prikazan je na slici 6. Vrlo slično ponašanje zabilježeno je i kod drugih modela. Možemo uočiti da s popuštanjem ploče bočni zidovi s krute strane modela trpe manje pomake u usporedbi s onima na sličnim modelima s neizmjereno krutom pločom. Za  $\gamma_s > 1,0$  pomaci tih zidova općenito su konstantni pa popuštanje ne utječe značajno na njihove pomake. Slično je ponašanje primijećeno i za zidove na fleksibilnoj strani

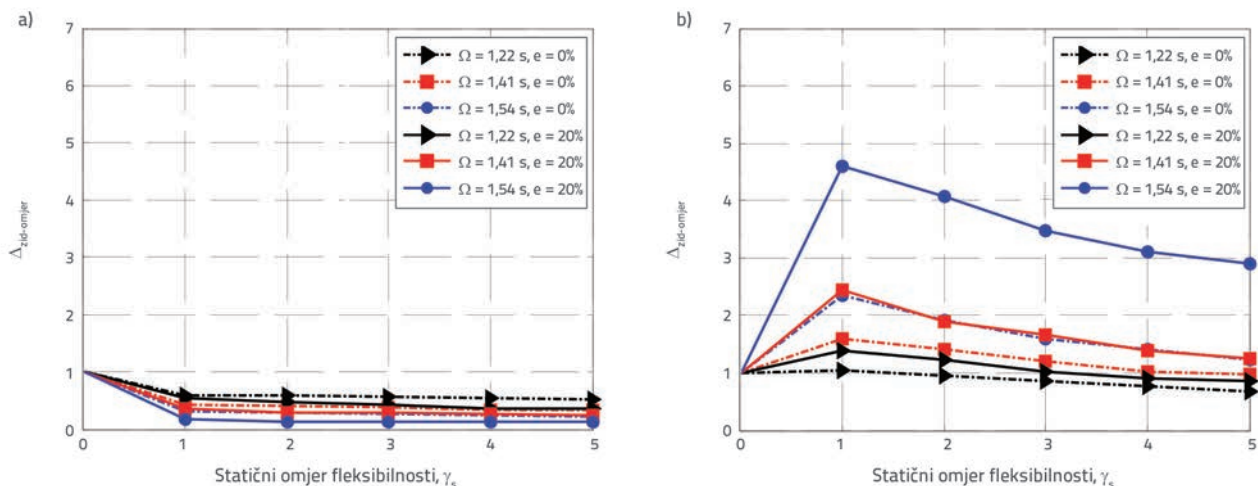

 Slika 5. Učinak popuštanja ploče na omjer temeljnih perioda titranja: a) Modeli različitih  $T$  ( $\Omega = 1,22$ ); b) Modeli različitih  $\Omega$  ( $T = 0,5$  s)



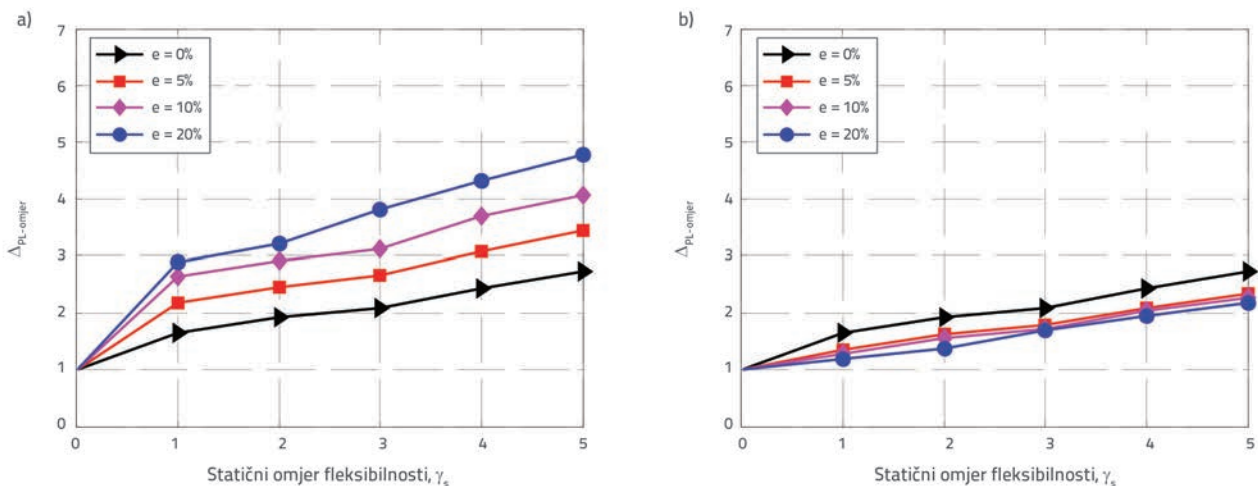
modela. Kod središnjih je zidova razdioba pomaka drugačija. U odnosu na slične modele s krutom pločom, pomaci tih zidova s popuštanjem rastu. Vršne vrijednosti dobivamo pri  $\gamma_s = 1,0$  pa ovu razinu popuštanja možemo smatrati kritičnom za simetrične i nesimetrične modele. Nakon kritične vrijednosti pomaci središnjih zidova su konstantni ili opadaju. Također, kod tih zidova raste s porastom.

Na slici 7. vidimo da s povećanjem  $\gamma_s$  raste srednji vršni ukupni pomak objiju strana ploče ( $\Delta_{PL-omjer}$ ). Na krutoj strani modela, veći e daje veći  $\Delta_{PL-omjer}$  u odnosu na simetrične modele. Na fleksibilnoj strani ponašanje je suprotno.

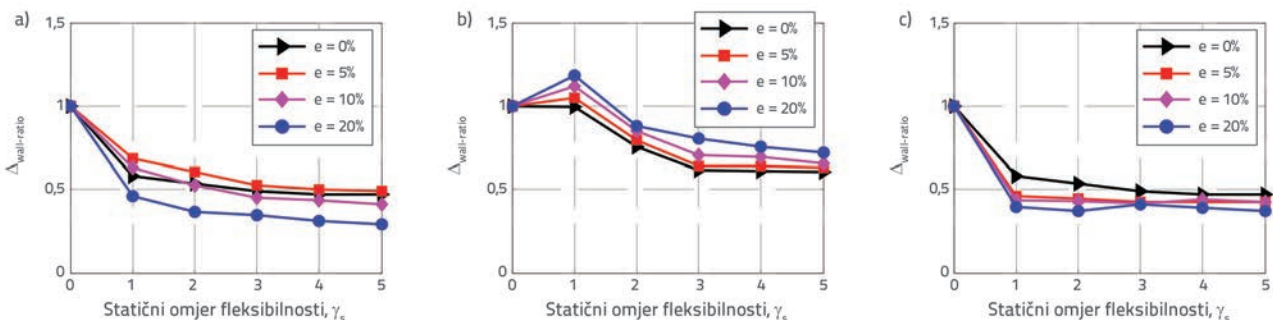
Ovisnost poprečne reakcije  $V_{zid-omjer}$  o  $\gamma_s$  prikazana je na slici 8. Vidljivo je da statička ekscentričnost povećava  $V_{zid-omjer}$  u središnjim zidovima. Popuštanje smanjuje  $V_{zid-omjer}$  u krajnjim zidovima.



Slika 6. Učinak popuštanja ploče na relativne pomake zidova ( $T = 0,5$  s): a) zidovi na krutoj strani; b) središnji zidovi



Slika 7. Učinak popuštanja ploče na  $\Delta_{PL-omjer}$  ( $T = 1,0$  s,  $\Omega = 1,22$ ): a) ploča s krute strane; b) ploča s fleksibilne strane



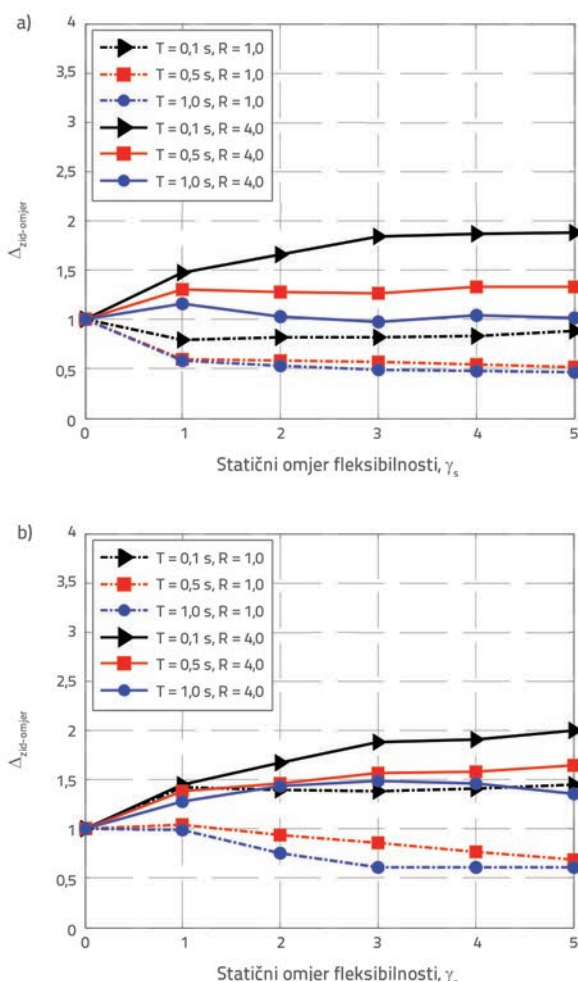
Slika 8. Učinak popuštanja ploče na poprečnu reakciju u zidovima ( $T = 1,0$  s,  $\Omega = 1,22$ ): a) zid na krutoj strani; b) središnji zid; c) zid na fleksibilnoj strani

## 4. Učinci popuštanja ploče u plastičnom području

Sila tečenja bočnih elemenata  $F_{yi}$  određena je za svaki zapis dijeljenjem maksimalne elastične zahtijevane sile  $F_{ei}$  faktorom smanjenja odziva  $R$ . Kao i u prethodnom poglavlju, smatramo da ploča ostaje elastična. Nelinearna analiza provedena je samo za konstrukciju s  $\Omega = 1,22$  i  $R = 1$  (elastično), 2, 4 i 6.

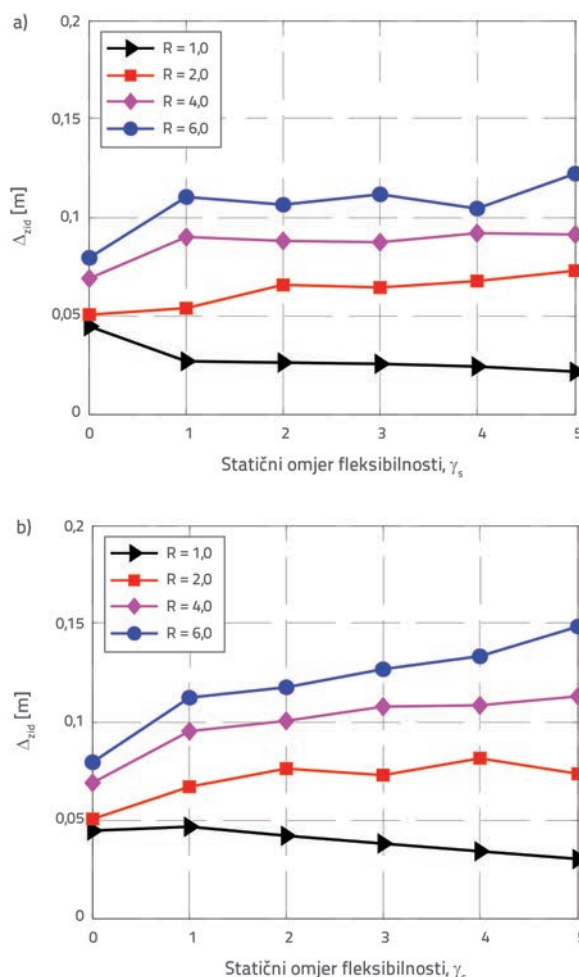
### 4.1. Učinci popuštanja na nelinearnu deformaciju zidova

Na slici 9. prikazan je utjecaj  $\Delta_{zid-omjer}$  na za simetrične konstrukcije s različitim  $T$  i  $R$ . Slično ponašanje vrijedi i za ostale modele. Suprotno ponašanju elastičnih modela, pomaci bočnih zidova veći su od onih u konstrukcijama s krutom pločom. Kod modela s manjim  $T$ , veći  $\gamma_s$  uzrokuje veće pomake svih zidova.



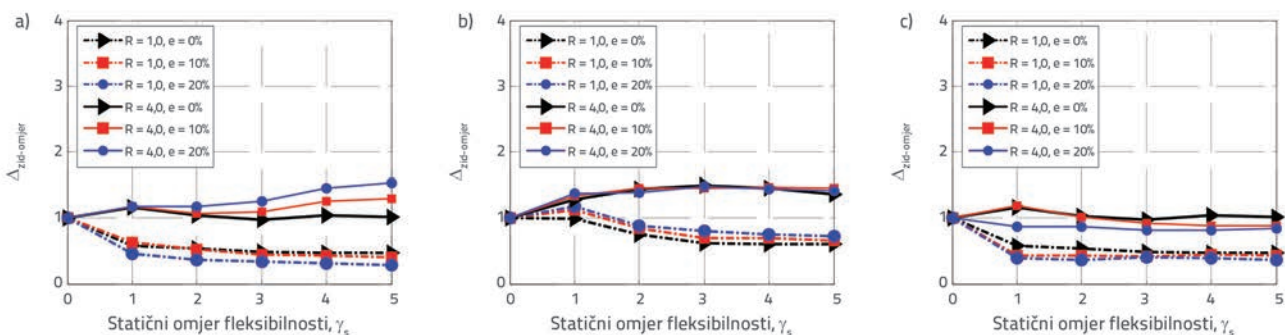
Slika 9. Učinak popuštanja ploče na omjer pomaka u zidovima ( $\Omega = 1,22$ ): a) vanjski zidovi; b) središnji zidovi

Učinci popuštanja na  $\Delta_{zid}$  simetričnih konstrukcija s  $T = 0,5$  s i različitim  $R$  prikazani su na slici 10. Uočavamo da veći  $R$  uzrokuje veće pomake zidova. Također, za razliku od elastičnih modela, popuštanje uzrokuje opći uzlazni trend pomaka.

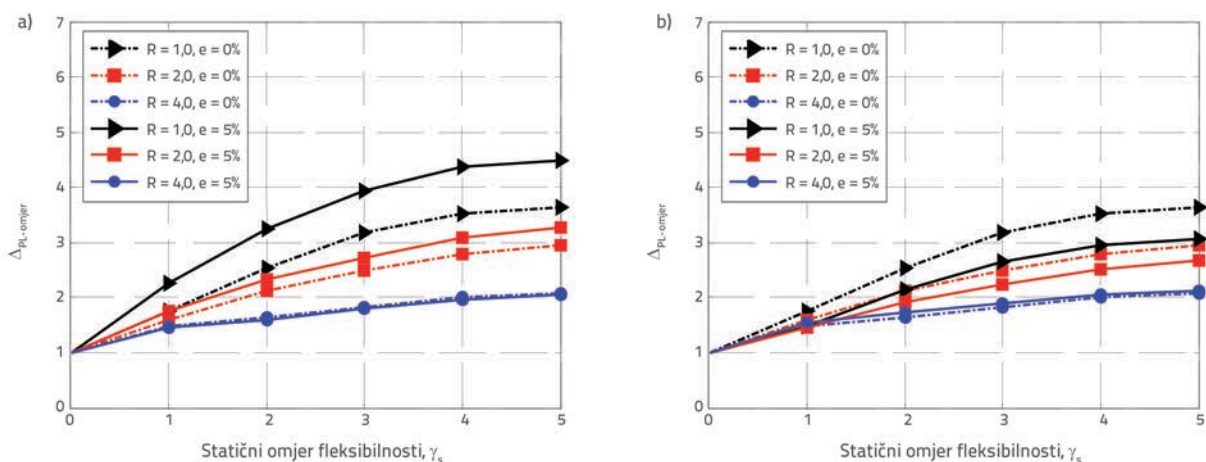


Slika 10. Učinak popuštanja ploče na pomak zidova ( $T = 0,5$  s,  $e = 0$  %,  $\Omega = 1,22$ ): a) vanjski zidovi; b) središnji zidovi

Ovisnost  $\Delta_{zid-omjer}$  o  $\gamma_s$  za nesimetrične modele prikazana je na slici 11. U odnosu na slične modele s krutom pločom, pomak zidova na krutoj strani modela s popuštanjem raste (slika 11.a). Isto tako, pri većim  $e$  zidovi kruće strane uglavnom imaju veći  $\Delta_{zid-omjer}$  nego kod simetričnih modela. U odnosu na slične modele s krutom pločom, porast  $\gamma_s$  znači veći pomak središnjeg zida za gotovo 50% (slika 11.b), a  $e$  ne utječe bitno na pomak tih zidova. Popuštanje ploče nema značajnog utjecaja na pomak zidova s fleksibilne strane neelastičnih modela (slika 11.c).



Slika 11. Učinak popuštanja ploče na omjer pomaka u zidovima nelinearnih modela ( $T = 0,5$  s,  $\Omega = 1,22$ ): a) vanjski zid na krutoj strani; b) središnji zid; c) vanjski zid na fleksibilnoj strani

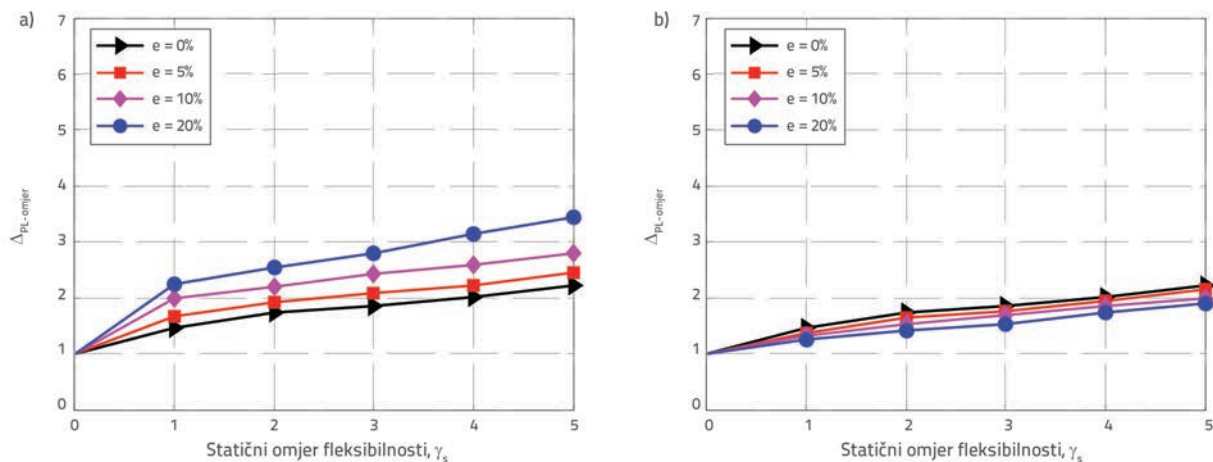


Slika 12. Utjecaj popuštanja na pomak ploče ( $T = 1,0$  s,  $\Omega = 1,22$ ): a) ploča s krute strane; b) ploča s fleksibilne strane

#### 4.2. Učinak popuštanja na deformaciju ploče

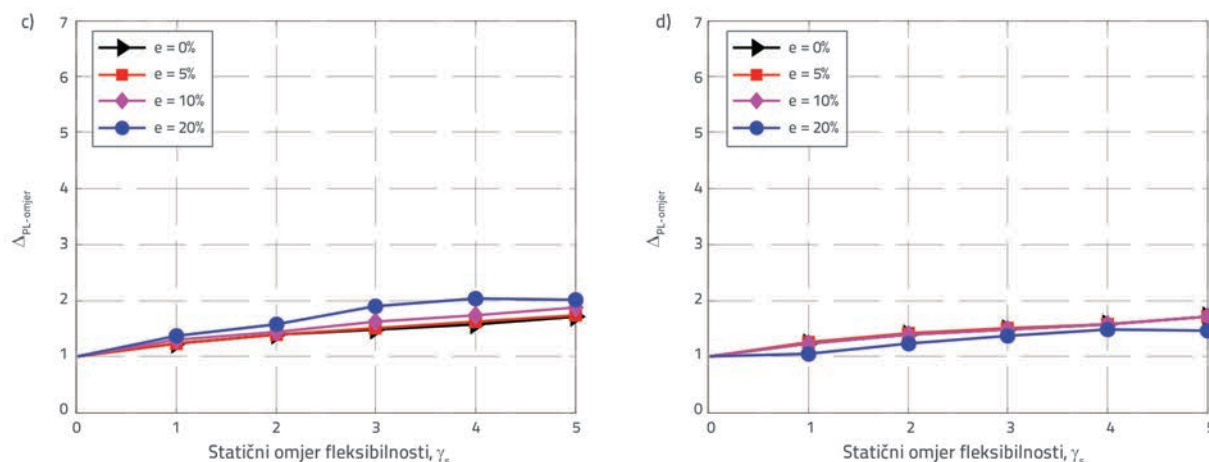
Učinak  $\gamma_s$  na  $\Delta_{PL-omjer}$  kod nesimetričnih konstrukcija za različite  $R$  prikazan je na slici 12. S porastom  $R$  dolazi do smanjenja  $\Delta_{PL-omjer}$  za obje ploče. Isto tako,  $\Delta_{PL-omjer}$  s

popuštanjem raste, ali je rast sve manje izražen. Na slici 13. vidimo učinak  $\gamma_s$  na  $\Delta_{PL-omjer}$  za konstrukcije s raznim  $e$ . Usporedimo li slike 7. i 13. vidimo da je osjetljivost na manja kod nelinearnih konstrukcija, te da veći  $\Delta_{PL-omjer}$  smanjuje učinak ekscentričnosti.



Slika 13. Utjecaj popuštanja na pomak ploče: a) ploča s krute strane ( $R = 2$ ); b) ploča s fleksibilne strane ( $R = 2$ ); c) ploča s krute strane ( $R = 6$ ); d) ploča s fleksibilne strane ( $R = 6$ )





Slika 13. Utjecaj popuštanja na pomak ploče: a) ploča s krute strane ( $R = 2$ ); b) ploča s fleksibilne strane ( $R = 2$ ); c) ploča s krute strane ( $R = 6$ ); d) ploča s fleksibilne strane ( $R = 6$ ) (nastavak slike)

## 5. Zaključci

U okviru opsežne parametarske studije istražen je utjecaj popuštanja ploče na seizmički odziv modela nesimetrična tlocrta, različitih čistih bočnih perioda titranja, razdiobe krutosti i omjera torzijske prema bočnoj frekvenciji. Pobuda je definirana zapisima ubrzanja u jednom smjeru. Analizirano je ponašanje modela u linearnom i nelinearnom području. Rezultati pokazuju sljedeće:

- Općenito, kod svih modela s izrazito popustljivom pločom temeljni je period titranja veći nego kod sličnih modela s neizmjenom krutom pločom. Kod modela nesimetrična tlocrta, naročito kod velike ekscentričnosti i/ili omjera torzijske prema bočnoj frekvenciji, uočeno je dodatno povećanje perioda u usporedbi sa sličnim simetričnim modelima. Kod modela s popustljivom pločom ovo povećanje, ovisno o periodu titranja elastičnog modela s krutom pločom i vrsti tla, može smanjiti ili povećati spektralno ubrzanje, čak ga i zadržati konstantnim.
- S popuštanjem ploče raspodjela bočnih sila između BNE više odgovara raspodjeli temeljenoj na sudjelujućim

površinama. Ta promjena u ponašanju modela uzrokuje veći pomak središnjih zidova nego u slučaju sličnih konstrukcija s krutom pločom. Kod modela nesimetrična tlocrta, veće ekscentričnosti i/ili omjera torzijske prema bočnoj frekvenciji, veći zahtijevani pomak trebaju središnji zidovi.

- Za razliku od elastičnih modela, vanjski zidovi neelastičnih modela s elastičnom pločom podložni su većim deformacijama od modela s krutom pločom. Statička ekscentričnost nije bitno utjecala na pomak središnjih zidova. Za razliku od linearnih modela, kod nelinearnih nije uočen kritični iznos popuštanja ploče.
- Općenito, zahtijevani pomak ploče nelinearnih modela manje je osjetljiv na ekscentričnost nego kod linearnih modela. Viši  $R$  uzrokuje niži  $\Delta_{PL-omjer}$  kako na pločama s krute tako i na pločama s fleksibilne strane modela.
- U ovom su radu učinci popuštanja ploče istraženi primjenom jednokatnih modela. Prema studijama [25, 26], može se očekivati poopćenje ovih rezultata i njihova primjena na nižim ili višim višekaticama.

## LITERATURA

- [1] De-La-Colina, J.: In-Plan Floor Flexibility Effects on Torsionally Unbalanced Systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28 (1999), pp. 1705-1715, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199912\)28:12<1705::AID-EQE873>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199912)28:12<1705::AID-EQE873>3.0.CO;2-5)
- [2] Farrow, K.T., Fleischman, R.B.: Dynamic Behaviour of Perimeter Lateral-System Structures with Flexible Diaphragms, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30 (2001), pp. 745-763, <https://doi.org/10.1002/eqe.36>
- [3] Tena-Colunga, A., Chinchilla-Portillo, K.L., Juárez-Luna, G.: Assessment of the diaphragm condition for floor systems used in urban buildings, *Engineering Structures*, 93 (2015), pp. 70-84.
- [4] Eivani, H., Sarvghad Moghadam, A., Aziminejad, A., Nekooei, M.: Seismic Response of Plan-Asymmetric Structures with Diaphragm Flexibility, *Shock and Vibration*, pp. 1-18, 2018, <https://doi.org/10.1155/2018/4149212>
- [5] Lee, H.J., Aschheim, M.A., Kuchma, D.: Interstorey Drift Estimates for Low-Rise Flexible Diaphragm Structures, *Engineering Structures*, 29 (2007), pp. 1375-1397, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.08.021>
- [6] Ahmadi, M., Abu Bakar, S., Satih Abbas, H.: Investigation into diaphragm flexibility using shear wall, *GRAĐEVINAR*, 66 (2014) 9, pp. 831-836, <https://doi.org/10.14256/JCE.1049.2014>

- [7] Morić, D.: Designing Seismic Response of Buildings without Rigid Floors, GRAĐEVINAR, 52 (2000) 11, pp. 673-681.
- [8] Jain, S.K., Jennings, P.C.: Analytical Models for Low-Rise Buildings with Flexible Floor Diaphragms, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 13 (1985), pp. 225-241, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290130207>
- [9] Moon, S.K., Lee, D.G.: Effects of In-plane Floor Slab Flexibility on the Seismic Behaviour of Building Structures, Engineering Structures, 16 (1994), pp. 129-144, [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(94\)90038-8](https://doi.org/10.1016/0141-0296(94)90038-8)
- [10] Tremblay, R., Stiemer, S.F.: Seismic Behaviour of Single-Storey Steel Structures with a Flexible Roof Diaphragm, Canadian Journal Civil Engineering, 23 (1996), pp. 49-62, <https://doi.org/10.1139/196-006>
- [11] Kim, S.C., White, D.W.: Nonlinear Analysis of a One-Storey Low-Rise Masonry Building with a Flexible Diaphragm Subjected to Seismic Excitation, Engineering Structures, 26 (2004), pp. 2053-2067, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.06.008>
- [12] Valipour, H.R., Foster, S.J.: Nonlinear Analysis of 3D Reinforced Concrete Frames: Effect of Section Torsion on the Global Response, Structural Engineering and Mechanics, 36 (2010), pp. 421-445, <https://doi.org/10.12989/sem.2010.36.4.421>
- [13] Koren, D., Kilar, V.: Torsion of seismically isolated structures of irregular plan, GRAĐEVINAR, 60 (2008) 2, pp. 99-108.
- [14] Tena-Colunga, A., Abrams, D.: Seismic Behaviour of Structures with Flexible Diaphragms, Journal of Structural Engineering, 122 (1996), pp. 439-445, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:4\(439\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:4(439))
- [15] Kunnath, S., Panahshahi, N., Reinhorn, A.: Seismic Response of RC Buildings with Inelastic Floor Diaphragms, Journal of Structural Engineering, 117 (1991), pp. 1218-1237, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:4\(1218\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:4(1218))
- [16] Eivani, H.: The effects of semi-rigid diaphragm on the seismic response of torsional buildings with reinforced concrete shear walls. Ph.D. Dissertation in person, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, 2018.
- [17] American Society of Civil Engineers (ASCE): Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-10), Virginia, USA, 2010.
- [18] Aschheim, M.: Seismic design based on the yield displacement, Earthquake Spectra, 18 (2002), pp. 581-600, <https://doi.org/10.1193/1.1516754>
- [19] Aziminejad, A., Moghadam, A.S.: Fragility-based performance evaluation of asymmetric single-storey buildings in near field and far field earthquakes, Journal of Earthquake Engineering, 14 (2010), pp. 789-816, <https://doi.org/10.1080/13632460902837728>
- [20] Paulay, T.: Some design principles relevant to torsional phenomena in ductile buildings, Journal of Earthquake Engineering, 5 (2001), pp. 273-308, <https://doi.org/10.1080/13632460109350395>
- [21] Myslimaj, B., Tso, W.K.: A strength distribution criterion for minimizing torsional response of asymmetric wall-type systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31 (2002), pp. 99-120, <https://doi.org/10.1002/eqe.100>
- [22] OpenSees Open System for Earthquake Engineering Simulation; Earthquake Engineering Research Center (PEER), California, USA, <http://opensees.berkeley.edu>, 2017.
- [23] Building and Housing Research Center: Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (Standard No. 2800), Tehran, Iran, 2014.
- [24] Luco, N.: Probabilistic seismic demand analysis, SMRF connection fractures, and near-source effects. Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 2002.
- [25] De la Llera, J.C., Chopra, A.K.: Accidental and Natural Torsion in Earthquake Response and Design of Buildings, Report of the Earthquake Engineering Research Center, Report No 94/07, University of California, Berkeley, California, USA, June 1994.
- [26] Nakamura, Y., Derakhshan, H., Magenes, G., Griffith, M.C.: Influence of Diaphragm Flexibility on Seismic Response of Unreinforced Masonry Buildings, Journal of Earthquake Engineering, pp. 1-26, 2016.